

# Radioaktiivisten aineiden käyttö teollisuuden merkkiainekokeissa

Eija Venelampi

ISBN 978-952-478-258-6 (nid.) Edita Prima Oy, Helsinki 2007  
ISBN 978-952-478-259-3 (pdf)  
ISSN 0781-1713

*VENELAMPI Eija. Radioaktiivisten aineiden käyttö teollisuuden merkkiainekokeissa. STUK-B 83. Helsinki 2007. 29 s.*

**Avainsanat:** merkkiaine, merkkiainekoe, avolähde radionuklidi, teollisuus, säteilyaltistus, päästö, annosraja, <sup>82</sup>Br, <sup>137m</sup>Ba

## Tiivistelmä

Radioaktiivisia aineita käytetään merkkiaineina mittauksissa, joissa halutaan tutkia teollisuusprosessien toimintaa. Merkkiainekokeissa käytettävät radionuklidit ovat yleensä lyhytikäisiä gammasäteilijöitä. Merkkiainekokeista pääsee ympäristöön (vesistöön ja ilmaan) vaihtelevia määriä radioaktiivisia aineita. Selvityksen tarkoituksena oli kartoittaa, mitä teollisuuden merkkiainekokeita ja niistä aiheutuvia ympäristöpäästöjä koskevia kansainvälisiä ja kansallisia määräyksiä, suosituksia ja ohjeita on olemassa. Lisäksi haluttiin selvittää, onko Suomessa tarpeen tämentää merkkiainekokeita koskevia vaatimuksia ja sisällyttää ne viranomaisohjeisiin.

Erityisesti merkkiainekokeisiin liittyvää säteilysuojelua tai niistä aiheutuvia päästöjä käsitteleviä määräyksiä tai ohjeita ei juuri ole olemassa. Merkkiainekokeiden valvonta toteutetaan useimmissa maissa soveltaen vaatimuksia, jotka on annettu avolähteiden käytölle laboratorioissa. Merkkiainekokeiden oikeutusta arvioidaan yleisesti radioaktiivisista päästöistä kriittisen ryhmän yksilölle aiheutuvan efektiivisen annoksen perusteella. Suomessa STUK on soveltanut kriittisen ryhmän yksilön efektiiviselle annokselle rajaa 10 µSv vuodessa. Selvityksen perusteella tavanomaisista merkkiainekokeista aiheutuva kriittisen ryhmän yksilön efektiivinen annos ei ylitä 10 µSv:ä vuodessa. Päästöt ovat vähäisiä myös poikkeavissa tilanteissa. Annosarvioiden kannalta riittävien tietojen saamiseksi merkkiainekokeita suorittavilta yrityksiltä voi kuitenkin olla tarpeen vaatia aiempaa tarkempia ilmoituksia ja selvityksiä kokeiden suorituksesta.

VENELAMPI Eija. *Use of radioactive substances in industrial tracer tests. STUK-B 83. Helsinki 2007. 29 pp.*

**Keywords:** radiotracer, tracer test, unsealed source, radionuclide, industry, radiation exposure, release, dose limit,  $^{82}\text{Br}$ ,  $^{137\text{m}}\text{Ba}$

## Abstract

Radioactive substances are used as tracers in measurements aimed to study industrial processes. Radionuclides used in tracer tests are usually short-lived gamma emitters. In the course of tracer tests, radioactive substances are released into environment (water systems or air) in varied amounts. The purpose of this review was to survey international and national regulations, recommendations and guides relating to industrial tracer tests or to environmental releases caused by the tests. Furthermore, an objective was to investigate if, in Finland, the requirements set for tracer tests should be more specific and included in regulations or guides.

Regulations, recommendations or guides concerning particularly radiation protection in tracer tests or releases caused by them are sparse. In most countries, regulatory control of tracer tests is performed applying requirements given for use of unsealed sources in laboratories. Justification of tracer tests is commonly estimated by the effective dose of the member of the critical group caused by radioactive releases. In Finland, STUK has applied the annual limit of 10  $\mu\text{Sv}$  as the effective dose of the member of the critical group. According to this survey the effective dose of any member of the critical group caused by usual tracer tests does not exceed 10  $\mu\text{Sv}$  per year. The releases are also minor in unusual situations. However, to get sufficient information in order to perform dose assessments, it might be necessary to demand the companies carrying out tracer tests to deliver more detailed notifications and reports about performing the tests.

# Sisällysluettelo

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
1 JOHDANTO	7
2 TEOLLISUUDEN MERKKIAINEKOKKEET SUOMESSA	8
2.1 Yleistä	8
2.2 Merkkiainekokeissa käytetyt radionuklidit ja aktiivisuudet	8
2.3 Merkkiaineiden valmistus	9
3 STUKIN VAATIMUKSET JA TOIMINNAN HARJOITTAJAN ILMOITUKSET	10
3.1 STUKin merkkiainekokeille asettamat vaatimukset	10
3.2 Toiminnan harjoittajan tekemät ilmoitukset	10
4 KANSAINVÄLISIÄ SUOSITUKSIA JA VAATIMUKSIA MUISSA MAISSA	12
4.1 Yleistä	12
4.2 IAEA:n julkaisut	12
4.3 Tanska	13
4.4 Norja	13
4.5 USA	14
5 PÄÄSTÖJÄ JA SÄTEILYANNOKSIA KOSKEVAT SÄÄDÖKSET JA OHJEET	15
5.1 EU-säädökset ja -julkaisut	15
5.2 Radioaktiiviset jätteet ja päästöt säteilyn käytössä	15
5.3 Päästöt ydinvoimalaitoksista	16
5.4 IAEA:n ohjeet	17
5.5 OSPAR	18
5.6 Iso-Britannia	18
6 PÄÄSTÖISTÄ AIHEUTUVAN SÄTEILYALTISTUKSEN ARVIOIMINEN	22
6.1 Yleistä	22
6.2 Vertailu ohjeen ST 6.2 ilmapäästörajoihin	22
6.3 Mallinnukset	23
6.3.1 Radioaktiivisten aineiden päästöistä ulkoilmaan aiheutuvan säteilyaltistuksen arvioiminen	23
6.3.2 Ydinvoimalapäästöistä aiheutuvien annosten arvioimiseen käytetty laskentaohjelma	23
7 JOHTOPÄÄTÖKSET	25
KIRJALLISUUSVIITTEET	27



# 1 Johdanto

Radioaktiivisia aineita käytetään tutkimuksessa ja teollisuudessa merkkiaineina. Teollisuuslaitoksissa merkkiaineita käytetään jätevesi- ja prosessivirtausmittauksissa, vuoto-testauksissa, viipymäaikamittauksissa sekä muissa mittauksissa, joilla halutaan seurata teollisuusprosessien toimintaa. Teollisuudessa käytetyt merkkiaineet ovat yleensä lyhytikäisiä gammasäteilijöitä, joiden kulkua voidaan seurata putkistojen ulkopuolelle sijoitettujen säteilyilmaisimien avulla. Teollisuudessa tehtävien kokeiden lisäksi radioaktiivisia merkkiaineita voidaan hyödyntää ympäristötutkimuksessa, esimerkiksi kulkeutumiskokeissa.

Laboratoriotyöskentelylle asetettuja vaatimuksia voidaan pääosin soveltaa teollisuuden merkkiainekokeisiin (ohje ST 6.1) [1]. Kentällä – laboratorion ulkopuolella – työskentely luo merkkiainekokeille kuitenkin ominaispiirteensä eivätkä kaikki laboratoriotyöskentelyä koskevat määräykset ole suoraan sovellettavissa. Merkkiainekokeet eivät ole teollisuuslaitosten päivittäistä rutiinia, vaan niitä tehdään esimerkiksi tuotantoprosessin mittalaitteiden kalibroinnin yhteydessä. Työ tilataan usein merkkiainekokeisiin erikoistuneelta yritykseltä.

Riippuen tutkimuksen kohteena olevasta teollisuusprosessista merkkiainekokeista pääsee ym-

päristöön (vesistöön ja ilmaan) vaihtelevia määriä radioaktiivisia aineita esimerkiksi lauhdevesien mukana. Laboratoriotyöskentelyä varten viemäri-verkkoon tai ilmaan päästettävälle radioaktiivisille aineille on annettu raja-arvot ohjeessa ST 6.2 [2]. Sen sijaan teollisuuden merkkiainekokeille ja niistä aiheutuville ympäristöpäästöille ei ole erikseen määriteltyjä vaatimuksia.

Tämän selvityksen tarkoituksena oli kartoittaa, onko Säteilyturvakeskuksen (STUK) teollisuuden merkkiainekokeille asettamia vaatimuksia tarpeen täsmentää ja sisällyttää ne viranomaisohjeisiin. Lisäksi on selvitetty, mitä kansainvälisiä ja kansallisia määräyksiä, suosituksia ja ohjeita on olemassa koskien teollisuuden merkkiainekokeita ja niistä aiheutuvia ympäristöpäästöjä. Tavoitteena oli myös selvittää, miten voidaan arvioida merkkiainekokeista ympäristöön pääsevien radioaktiivisten aineiden määrät ja millaisia säteilyannoksia päästöistä voi aiheutua kriittiselle ryhmän yksilölle.

Tässä selvityksessä keskitytään teollisuuden merkkiainekokeista aiheutuviin ympäristöpäästöihin ja niistä väestölle aiheutuvien annosten arviointiperusteisiin. Selvityksen pääpaino on niissä menetelmissä ja radionuklideissa, joita käytetään Suomessa.

## 2 Teollisuuden merkkiainekokeet Suomessa

### 2.1 Yleistä

Suomessa teollisuuden merkkiainekokeita tehdään eniten puunjalostus- ja kemianteollisuudessa sekä energiantuotannossa. Radioaktiivinen merkkiaine syötetään teollisuusprosessiin, jossa sen viipymä-aikaa tai sekoittumista prosessissa mitataan putkistojen ulkopuolelle sijoitettujen detektoreiden avulla (esim. NaI-tuikeilmaisoin). Merkkiaineet ovat avolähteitä ja ne voivat olla nestemäisessä, kaasumaisessa tai kiinteässä (esim. jauheena) muodossa. Aine voidaan syöttää prosessiin erillisinä pulsseina, vähitellen pidemmän ajan kuluessa tai yhtenä eränä.

Tutkimuksen tarkoituksesta, tutkimusmenetelmästä ja teollisuusprosessista riippuen:

- Merkkiaine kulkeutuu esimerkiksi lauhde- tai jäteveden mukana vesistöön tai kaasumaisten päästöjen mukana ilmaan. Merkkiaineen aktiivisuus sen päästessä ympäristöön riippuu merkkiaineena käytettävän radionuklidin puoliintumisajasta ja merkkiaineen viipymäajasta prosessissa.
- Merkkiaine syötetään suljettuun kiertoon, jolloin radioaktiivisia aineita ei pääse ympäristöön (esim. suljettu prosessivesikierto).
- Merkkiaine jää tuotteeseen (esim. selluun). Tällaisissa tapauksissa tuotetta on vanhennettava ennen jatkojalostusta tai myyntiin saattamista niin kauan, että siinä olevat radioaktiiviset aineet ovat hävinneet radioaktiivisen hajoamisen seurauksena.
- Yhdistelmä edellisistä.

### 2.2 Merkkiainekokeissa käytetyt radionuklidit ja aktiivisuudet

Suomessa yleisin merkkiaineena käytetty radionuklidi on  $^{82}\text{Br}$  joko kaliumbromidin vesiliuoksena tai kaasumaisessa muodossa olevana etyylibromidina. Vuoden 2006 aikana 39 merkkiainekokeessa käytettiin kaliumbromidia ja 23 kokeessa etyylibromidia. Vuonna 2005 vastaavat luvut olivat 36 ja 26.

Näiden lisäksi muutamissa merkkiainekokeissa on käytetty muita  $^{82}\text{Br}$ :llä merkittyjä aineita, esimerkiksi orgaanisia yhdisteitä.

Toinen paljon käytetty radionuklidi on  $^{137\text{m}}\text{Ba}$ . Viimeisen kymmenen vuoden aikana  $^{137\text{m}}\text{Ba}$ :llä on tehty teollisuuden merkkiainekokeita noin 15–30 teollisuuslaitoksessa vuosittain. Nämä kokeet ovat lähinnä erilaisia virtausmittauksia, esimerkiksi kaukolämpö- tai jätevesivirtausmittauksia.  $^{137\text{m}}\text{Ba}$ :n lyhyen puoliintumisajan (2,6 min) vuoksi kyseisistä mittauksista aiheutuvien ympäristöpäästöjen voidaan arvioida olevan päästöistä aiheutuvan säteilyaltistuksen kannalta merkityksettä. Työskentelyssä tulee kuitenkin huolehtia siitä, ettei  $^{137}\text{Cs}/^{137\text{m}}\text{Ba}$ -generaattorista pääse leviämään ympäristöön  $^{137}\text{Cs}$ :ää.

Ydinvoimaloissa tehdään aktiivihiihi-suodattimien testauksia  $^{131}\text{I}$ :llä leimatulla metyylijodidilla. Ympäristöpäästöjen kannalta näitä merkkiainekokeita ei voi pitää ongelmana, koska radioaktiivinen jodi pidättyy lähes täydellisesti (99,99 %) aktiivihiihi-suodattimiin eikä siten vapaudu ympäristöön.

Muita merkkiainekokeissa käytettäviä radionuklideja ovat  $^{24}\text{Na}$ ,  $^{41}\text{Ar}$ ,  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ,  $^{140}\text{La}$ ,  $^{198}\text{Au}$  ja  $^{203}\text{Hg}$ . Näiden käyttö merkkiainekokeissa on kuitenkin melko satunnaista. Esimerkiksi vuosien 2005–2006 aikana  $^{24}\text{Na}$ :llä ja  $^{203}\text{Hg}$ :lla tehtiin kummallakin kaksi koetta sekä lisäksi  $^{41}\text{Ar}$ :llä,  $^{140}\text{La}$ :llä ja  $^{198}\text{Au}$ :lla kullakin yksi koe.

Merkkiainekokeissa käytettävät radionuklidit ovat yleensä suhteellisen lyhytikäisiä. Taulukossa I on esitetty tavanomaisten merkkiaineiden puoliintumisajat, vapaarajat, tyypilliset merkkiainekoetta varten varatut aktiivisuudet sekä esimerkkejä käyttökohteista [3].

Mittausten tekemiseen kuluva aika vaihtelee yleensä yhdestä neljään päivään mittausten laajuudesta riippuen. Kokeessa saatetaan käyttää vain osa kokeeseen varatusta merkkiaineesta (10–100 %). Ylimääräisen aineen varaaminen kokeisiin voi olla perusteltua, jos kokeen vaatimia merkki-



ainepulssimääriä tai mahdollisia toistoja ei syystä tai toisesta pystytä tarkasti ennustamaan etukäteen. Esimerkiksi käytettäessä  $^{82}\text{Br}$ :lla leimattua etyylibromidia merkkiaineena uuden merkkiaine-erän valmistaminen olisi hankalaa, sillä kuljetus-säiliö toimii myös reaktoriastiana.

Mittauksissa yli jäänyt merkkiaine on radioaktiivista jätettä ja se on kuljetettava asianmukaisesti merkkiainekokeita tekevän yrityksen varastotiloihin vanhenemaan valvotuissa olosuhteissa tai se voidaan hävittää paikan päällä ottaen huomioon ohjeessa ST 6.2 esitetyt raja-arvot. Nesteitä voi päästää viemäriverkkoon ohjeessa ST 6.2 esitettyjen rajojen puitteissa, mutta silloinkin lyhytikäisiä radionuklideja sisältävät jätteet on ensisijaisesti vanhennettava.

## 2.3 Merkkiaineiden valmistus

Suomessa VTT valmistaa  $^{82}\text{Br}$ -kaliumbromidia jauhemaisesta kaliumbromidista ja  $^{82}\text{Br}$ -etyylibro-

midia nestemäisestä etyylibromidista reaktorissa säteilyttämällä neutroneilla.

Merkkiainekokeessa tarvittava kaasumainen etyylibromidi tehdään koepaikalla rikkomalla nestemäistä etyylibromidia sisältävä lasiampulli suljetussa reaktioastiassa, jota lämmittämällä aine saatetaan kaasumaiseen muotoon. Etyylibromidin kiehumispiste on  $+37\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Kaasumainen etyylibromidi voidaan myös valmistaa koepaikalla kiinteässä muodossa olevasta kaliumbromidista väkevän rikkihapon ja etanolin avulla lämmittämällä liuos  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ :een. Kaliumbromidin reagoidessa rikkiha-  
pon kanssa muodostuu ensin vetybromidia ( $\text{HBr}$ ) ja tämän reagoidessa edelleen etanolin kanssa etyylibromidia.

Merkkiainekokeissa käytettävä  $^{137\text{m}}\text{Ba}$  tuotetaan  $^{137}\text{Cs}/^{137\text{m}}\text{Ba}$ -generaattoreilla. Generaattoriin käytettävän  $^{137}\text{Cs}$ :n aktiivisuus on tyypillisesti  $1,85 \cdot 10^9\text{ Bq}$ .

**Taulukko I.** Merkkiaineina käytettyjä radionuklideja sekä niiden puoliintumisaajat, vapaarajat, merkkiainekokeissa käytetyt aktiivisuudet ja tyypilliset käyttökohteet [3].

Radio-nuklidi	Puoliintumisaika $T_{1/2}$	Vapaaraja/ aktiivisuus (Bq)	Aktiivisuus/koe <sup>*)</sup>		Esimerkki käyttökohteesta
			(Bq)	(Gq)	
$^{82}\text{Br}$	1,5 d	$10^6$	$0,5\text{--}40 \cdot 10^9$	$0,5\text{--}40$	Jätevesivirtausmittaukset (kaliumbromidi) Höyry, savukaasu- tai maakaasuvirtausmittaukset (etyylibromidi)
$^{137\text{m}}\text{Ba}$	2,6 min		**) )	**) )	Kaukolämpö- ja jätevesivirtausmit- taukset
$^{24}\text{Na}$	15,0 h	$10^5$	$1\text{--}5 \cdot 10^9$	$1\text{--}5$	Malmilietteen sekoittumistutkimus
$^{41}\text{Ar}$	1,8 h	$10^9$	$15 \cdot 10^9$	15	Savukaasujen viipymääajan mittaus
$^{140}\text{La}$	1,7 d	$10^5$	$0,5 \cdot 10^9$	0,5	Sellukeittimen tutkimus (hakepalojen merkitseminen merkkiaineella ja niiden kulkeutumisen/sekoittumisen selvittäminen)
$^{198}\text{Au}$	2,7 d	$10^6$	$0,5 \cdot 10^9$	0,5	Kuten $^{140}\text{La}$ (ks. edellinen)
$^{131}\text{I}$	8,0 d	$10^6$			Aktiivihiiisuodattimien testaus
$^{203}\text{Hg}$	46,6 d	$10^5$	$3 \cdot 10^9$	3	Elektrolyysilaitteiston elohopeamäärän määrittäminen

<sup>\*)</sup> Yhtä merkkiainekoetta varten varattu merkkiaineen aktiivisuus toiminnan harjoittajan ilmoitusten perusteella.  
<sup>\*\*) )</sup>  $^{137\text{m}}\text{Ba}$ :n käyttö merkkiainekokeissa yhteensä noin 200–400 GBq/vuosi. Vuosittain kokeita 15–30 teollisuuslaitoksessa.

## 3 STUKin vaatimukset ja toiminnan harjoittajan ilmoitukset

### 3.1 STUKin merkkiainekokeille asettamat vaatimukset

Teollisuuden merkkiainekoetoimintaan on oltava STUKin tarkoitukseen myöntämä turvallisuuslupa. Merkkiainekokeille tai merkkiaineiden päästämiseksi ympäristöön ei ole olemassa erillisiä määräyksiä tai ohjeita. Niitä koskevat mm. ohjeet ST 1.1 ja ST 1.6 ja soveltuvin osin ohjeet ST 6.1 ja ST 6.2 [4,5,1,2]. Vaatimukset merkkiainekokeille on esitetty turvallisuusluvassa ja tarkastuspöytäkirjoissa.

Turvallisuusluvuissa tai tarkastuspöytäkirjoissa STUK on esittänyt toiminnalle mm. seuraavia vaatimuksia:

- Täysin uudennaiselle merkkiainekokeelle on haettava lupaa STUKilta. Tämän jälkeen samanlaisina toistuvista merkkiainekokeista on toimitettava kirjallinen ilmoitus etukäteen STUKille.  $^{137}\text{mBa}$ :lla tehdyistä merkkiainekokeista ilmoituksen voi tehdä kalenterivuositain jälkikäteen.
- Uusista  $^{137}\text{Cs}/^{137}\text{mBa}$ -generaattoreista on toimitettava STUKille testaustodistukset ja koe-eluintien tulokset ennen käyttöönottoa.
- Ennen merkkiainekokeen tekemistä on varmistuttava, että merkkiainekokeisiin käytetyssä eluaatissa  $^{137}\text{Cs}/^{137}\text{mBa}$ -suhde on korkeintaan 1/10 000 eli  $^{137}\text{Cs}$ :n määrä saa olla korkeintaan 0,01 % [6].
- Merkkiainekokeita itsenäisesti tekevillä työntekijöillä on oltava vastaavan johtajan pätevyys avolähteiden käytön alalta.
- Merkkiainekokeita tekevät työntekijät kuuluvat säteilytyöluokkaan A, jos kerralla käsiteltävien avolähteiden määrä ylittää ohjeen ST 1.6 liitteessä B esitetyt aktiivisuusrajat [5]. Raja on gammasäteilijöillä 100 MBq ja beetasäteilijöillä 10 MBq (maksimienergia yli 0,3 MeV) tai 100 MBq (maksimienergia 0,1–0,3 MeV). Säteilytyöluokkaan A kuuluville työntekijöille

on järjestettävä henkilökohtainen annostarkkailu siten, että tarkkailujakson pituus on yksi kuukausi.

- Myös käsien annostarkkailun tarve on selvitettävä, kun uusi työmenetelmä tai radioaktiivinen aine otetaan käyttöön tai kun uusi työntekijä aloittaa työskentelyn merkkiaineilla.
- On käytettävä asianmukaisia suojavarusteita, kuten esimerkiksi suojakäsineitä ja ruiskunsuojia.
- Kontaminaatiomittaukset on tehtävä mittauksen aikana ja niiden jälkeen.
- Tarvittavat puhdistustoimet on tehtävä, mikäli pintakontaminaatorajat ylittyvät.
- On oltava kirjalliset ohjeet, joissa on myös säteilysuojeluohjeet ja toimintaohjeet poikkeavien tapahtumien varalta.
- Käyttämättä jäänyt merkkiaine on kuljetettava takaisin yrityksen varastoon ja vanhennettava asianmukaisesti ennen hävittämistä. Se voidaan hävittää myös paikan päällä ottaen huomioon ohjeessa ST 6.2 esitetyt raja-arvot [2].
- Kuljetuspakkausten pitää täyttää niille asetetut vaatimukset.

Radioaktiivisia aineita kuljetettaessa on noudatettava voimassa olevia kuljetusmääräyksiä.

Päästöistä aiheutuva kriittisen ryhmän yksilön efektiivinen annos ei saa ylittää arvoa 10  $\mu\text{Sv}$  vuodessa. Kriittisellä ryhmällä tarkoitetaan väestöryhmää, jolle voidaan sen asuinpaikan ja elintapojen perusteella arvioida aiheutuvan suurimmat säteilyannokset (ohje ST 6.2) [2].

### 3.2 Toiminnan harjoittajan tekemät ilmoitukset

Toiminnan harjoittajan merkkiainekokeita koskeissa ilmoituksissa on yleensä mainittu seuraavat seikat:

- merkkiainekokeen suorituspaikka ja -aika
- mittauskohde
- käytettävä merkkiaine ja sen aktiivisuus
- lyhyt kuvaus mittauksen suorituksesta
- vastaava johtaja (kokeen suorittaja)
- säteilyturvallisuustarkastelu.

Säteilyturvallisuustarkastelu on yleensä sisältänyt karkean arvion radioaktiivisen aineen laimenemisestä prosessissa (neste-, höyry- tai kaasuvir-

tauksessa) sekä tämän perusteella annetun arvion siitä, kuinka paljon tulisi niellä esimerkiksi jätevettä tai hengittää höyryä, jotta 1 mSv:n annos ylittyisi. Ilmoitusten niukkuuden vuoksi ympäristöön pääsevien radioaktiivisten aineiden määrä ei käy yleensä tarkasti selville. Esimerkiksi merkkiaineen viipymää tai arvioitua viipymää prosessissa ennen päästöä vesistöön tai ilmaan ei ole ilmoitettu.

## 4 Kansainvälisiä suosituksia ja vaatimuksia muissa maissa

### 4.1 Yleistä

Teollisuuden tutkimusten lisäksi maailmalla tehdään merkkiainekokeita myös ympäristössä, esimerkiksi pohja- tai pintavesien saastumismekanismien tutkimiseksi. Radioaktiivisia merkkiaineita (pääasiassa jodin isotoopit  $^{131}\text{I}$  ja  $^{125}\text{I}$  sekä tritioitu vesi) hyödynnetään lisäksi geotermisten varantojen tutkimuksessa [7]. Geotermistä energiaa käytetään hyväksi energiantuotannossa mm. Yhdysvalloissa, Aasian saarivaltioissa, Väli-Amerikassa, Uudessa-Seelannissa ja Islannissa.

Joissakin maissa, etenkin Yhdysvalloissa, radioaktiivisten merkkiaineiden käyttö on yleistä öljy- ja kaasuteollisuuden prosessimittauksissa ja öljyesiintymien tutkimuksessa. Merkkiaineita käytetään myös ilmanvaihdollisiin tutkimuksiin sekä juomaveden tuotantoon tai jakeluun (vuotomittaukset) tai jäteveden käsittelyyn liittyviin mittauksiin.

Merkkiainekokeita koskevat kansainväliset suositukset ja julkaisut paneutuvat lähinnä kokeiden tekniseen suorittamiseen eikä niissä käsitellä säteilysuojelua kovinkaan syvällisesti. Yksityiskohtaisia nimenomaan merkkiainekokeita koskevia säteilysuojelumääräyksiä ei juuri ole olemassa. Seuraaviin lukuihin on koottu tätä selvitystä varten läpi käydyistä julkaisuista ne kohdat, jotka käsittelevät merkkiainekokeisiin liittyviä vaatimuksia tai suosituksia.

### 4.2 IAEA:n julkaisut

IAEA on julkaissut Technical Reports -sarjassaan useita oppaita radioaktiivisten merkkiaineiden käytöstä teollisuudessa, joista viimeisin on vuodelta 2004 [7,8,9]. Lisäksi TECDOC-sarjassa on julkaistu muutamia merkkiainekokeita koskevia raportteja [10,11]. Nämä julkaisut keskittyvät lähinnä laitetekniikkaan, menetelmän valitsemiseen, kokeiden käytännön suorittamiseen sekä mittaustulosten käsittelyyn ja laskentaan sekä sisältävät esimerkkejä erityyppisistä merkkiaine-

kokeista. Säteilysuojelua tai jätteiden käsittelyä ja päästöjä käsitellään julkaisuissa erittäin niukasti. Säteilysuojelun osalta niissä keskitytään työntekijöiden altistukseen.

Technical Report No. 423:n [7] mukaan merkkiainekoetoiminnan tulee olla lupamenettelyn alaista aina, kun käytettävä aktiivisuus ylittää vapaarajan. Koska olosuhteet ja sovellusympäristö voivat vaihdella, tulee turvallisuusarviointi tehdä erikseen jokaiselle erilaiselle sovelluskohteelle, jossa aktiivisuus on vapaarajaa suurempi. Kussakin sovelluskohteessa tulee huomioida sekä työntekijöiden että väestön altistus ja varmistaa, että toiminnasta aiheutuva säteilyaltistus on mahdollisimman pieni (optimointiperiaate). Ohjeen mukaan kokeen suorittajat ja tilanteesta riippuen myös muut työntekijät (esim. prosessinhoitajat) tulisi katsoa säteilytyöntekijöiksi. Pääsääntöisesti tehtaan työntekijät tulisi laskea väestöön kuuluviksi ja annosrajat määritellä sen mukaisesti. Turvallisuusarvioinnin tarkkuuden pitää olla suhteessa säteilylähteen aiheuttamaan vaaraan. Merkkiainekokeissa kovin yksityiskohtainen arviointi ei ole yleensä tarpeen. Julkaisu IAEA-TECDOC-1113 sisältää mallin lupahakemuslomakkeesta avolähteiden käyttöön teollisuudessa [12]. Radioaktiivisten jätteiden osalta mallilomakkeessa vaaditaan seuraavat selvitykset: radionuklidi, muoto (liuos/kaasu), maksimiaktiivisuus ja ehdotettu hävittämistapa.

Technical Report No. 423:n [7] mukaan silloin, kun merkkiainekokeeseen soveltuvia nuklideja on olemassa useampia, tulisi valita nuklidi jolla on lyhyempi puoliintumisaika ja josta aiheutuu pienempi säteilyannos (ks. kohta 5.2). On myös suotavaa valita nuklidi, jolla on hyvä havaitsemisherkkyys, koska tällöin kokeen teknisen toteuttamisen kannalta vaadittava aktiivisuus on pienempi. Jätteistä todetaan, että aktiivisuus pitää laimentaa hyväksyttävälle tasolle ennen hävittämistä. Muussa tapauksessa jätettä pitää varastoida kunnes aktii-

visuus on sallitulla tasolla.

Ölly- ja kaasuteollisuuden säteilysuojelua ja jätteidenkäsittelyä koskevassa Safety Report No. 34:ssä [13] käsitellään yhtenä osa-alueena avolähteiden käyttöä merkkiaineina. Vaikka ohje keskittyykin jätteisiin, käsitellään säteilysuojeluasioita enemmän kuin varsinaisissa merkkiainekokeita käsittelevissä julkaisuissa. Ohjeessa käsitellään myös muita öljyteollisuudessa syntyviä radioaktiivisia jätteitä, joita syntyy enemmän ja jotka ovat säteilysuojellisesti merkityksellisempiä ja vaikutukseltaan pitkäaikaisempia kuin merkkiainekoikeista peräisin olevat radioaktiiviset jätteet.

Öljynjalostusteollisuuden merkkiainekokeissa yleisimmin käytetyt nuklidit ovat gammasäteilyä lähettävät  $^{46}\text{Sc}$ ,  $^{140}\text{La}$ ,  $^{56}\text{Mn}$ ,  $^{24}\text{Na}$ ,  $^{124}\text{Sb}$ ,  $^{192}\text{Ir}$ ,  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{110\text{m}}\text{Ag}$  ja  $^{133}\text{Xe}$  ja  $^{82}\text{Br}$ . Silloin kun näytteenotto prosessista on mahdollista, saatetaan käyttää myös beetasäteilijöitä, kuten  $^3\text{H}$  ja  $^{14}\text{C}$ .

Merkkiainekokeet tehdään tavallisesti laboratorio-oloja epäsuotuisammissa olosuhteissa. Samoja säteilysuojeluperiaatteita voidaan kuitenkin soveltaa myös merkkiainekokeisiin. Safety report No. 34:n [13] mukaan tulee huolehtia mm. seuraavista seikoista:

- kaikkien altistustapojen huomioonottaminen
- valvonta-alueen eristäminen
- alkutilanteen selvittäminen
- suojien asettaminen vuotojen varalle
- liitoskohtien tiiveyden varmistaminen
- varautuminen ongelmatilanteisiin siten, että korjaavat toimet voidaan suorittaa helposti ja tarvittavat välineet ovat valmiina ja helposti saatavilla
- kokeiden jälkeiset kontaminaatiomittaukset sekä niiden tulosten antaminen tilojen haltijalle
- kuljetuspakkauksen on oltava sellainen, että merkkiaine voidaan helposti ottaa käyttöön kokeen suorituspaikalla.

Ohje korostaa, että toiminnassa tulee pyrkiä minimoimaan radioaktiivisten jätteiden muodostuminen. Tämän vuoksi kokeeseen soveltuvista radionuklideista tulisi valita mahdollisimman lyhytikäinen sekä käyttää niin pieniä aktiivisuuksia kuin kokeen kannalta on järkevää. Valvonta-alueilla tulee säilyttää mahdollisimman vähän sellaista tavaraa, joka voi kontaminoitua. Oikeilla työtaavoilla voidaan myös minimoida syntyvien radioak-

tiivisten jätteiden määrä. Jos puoliintumisaika on pienempi kuin 100–200 vuorokautta, tulee jätteet vanhentaa ennen hävittämistä. Ohjeessa ei käsitellä päästöjä ympäristöön.

## 4.3 Tanska

Tanskan säteilyturvallisuusviranomainen Statens Institut for Strålehygiejne (SIS, nykyisin Statens Institut for Strålebeskyttelse) on joulukuussa 2004 julkaissut opaskirjassen  $^{82}\text{Br}$ :n käytöstä merkkiainekokeissa [14]. Oppaassa annetaan ohjeita, jotka koskevat mm. radioaktiivisten aineiden kuljetusta, säilytystä, säteilysuojelua kokeiden aikana ja annosrajoja. SIS:stä saadun tiedon mukaan opas kattaa ainoastaan  $^{82}\text{Br}$ :n käytön putkistojen vuototestauksissa, jollaisia tehdään lähinnä yksityisasunnoissa [15]. Tällaiset kokeet ovat yleisiä Tanskassa, koska putkistot ovat tyypillisesti upotettuina rakenteisiin eikä vuototestejä voida muunlaisin menetelmin suorittaa. Vuonna 2005 Tanskassa oli toimintaan lupa noin 15 yrityksellä. Koetta kohti käytetty merkkiaineen aktiivisuus on yleensä 20–100 MBq. Ostolupa toiminnan harjoittajalle annetaan normaalisti 0,5–2 GBq:n hankintaan kerrallaan.

Kyseisessä oppaassa esitetyt ohjeet eivät koske teollisuuden merkkiainekokeita. Tanskassa teollisuuden merkkiainekokeita valvotaan Terveystieteiden tutkimuskeskuksen (Sundhedstilsynet) päätöksen 954/2000 perusteella, joka koskee avolähteiden käyttöä mm. sairaaloissa ja laboratorioissa [16]. Teollisuuden merkkiainekokeiden osalta päätöksessä ei ole erillisiä vaatimuksia. Lupaehdot harkitaan tapauskohtaisesti ja lupa on usein kertaluonteinen. Teollisuuden kokeissa käytetyt aktiivisuudet ovat huomattavasti suurempia kuin aiemmin mainituissa putkistojen vuototestauksissa.

Yrityksen on ilmoitettava SIS:lle etukäteen merkkiainekokeesta, ja se on tämän lisäksi velvollinen neljän viikon sisällä merkkiainekokeen päättymisestä antamaan yksityiskohtaisemman raportin tehdyistä toimenpiteistä [15].

## 4.4 Norja

Öljyteollisuuden merkkiainekokeita tehdään Norjassa Pohjanmerellä sekä radioaktiivisilla että ei-radioaktiivisilla merkkiaineilla. OSPARin julkaisun [17] mukaan kokeita tehdään mm. tritiumilla ( $^3\text{H}$ ) ja  $^{14}\text{C}$ :llä ja ne päätyvät päästöinä mereen.

Norjan säteilyturvallisuusviranomaisen Statens Strålevernin (Norwegian Radiation Protection Authority, NRPA) internetsivuilla on hakemuslomake laboratorion ulkopuolella tehtäviä merkkiainekokeita varten [18]. Kaksisivuinen yleishakemuksen lisäksi toiminnan harjoittajan tulee täyttää viisivuinen merkkiainekokeiden suoritusta koskeva lomake. Kyseisissä lomakkeissa pyydetään tiedot mm. käytettävistä radionuklideista ja niiden aktiivisuudesta, työn eri vaiheisiin liittyvistä säteilysuojeluohjeista sekä työskentelyssä käytettävistä suojavälineistä. Lisäksi erillinen lomake tulee täyttää jätteiden käsittelystä ja päästöistä ympäristöön [19].

## 4.5 USA

Yhdysvaltain ydinturvallisuusviranomainen U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC) on laatinut ohjeistuksen luvan hakemisprosessista käytettävässä radioaktiivisia aineita öljyteollisuudessa käsittäen myös merkkiainekokeet [20]. Ohjeessa lueteltuja merkkiaineita ovat  $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{35}\text{S}$ ,  $^{45}\text{Ca}$ ,  $^{46}\text{Sc}$ ,  $^{59}\text{Fe}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{63}\text{Ni}$ ,  $^{65}\text{Zn}$ ,  $^{82}\text{Br}$ ,  $^{85}\text{Kr}$ ,  $^{85}\text{Sr}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{110\text{m}}\text{Ag}$ ,  $^{124}\text{Sb}$ ,  $^{125}\text{I}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{140}\text{La}$ ,  $^{192}\text{Ir}$  ja  $^{198}\text{Au}$ .

Lupahakemuksessa tulee mainita mm. seuraavat seikat:

- kussakin merkkiainekoesovelluksessa käytettävä radionuklidi ja sen kemiallinen ja/tai fyysikaalinen muoto
- kunkin radionuklidin osalta suurin kerrallaan hallussa oleva aktiivisuus (sisältää myös jätteenä varastoitavat)
- suurin koetta kohden käytettävä aktiivisuus
- arvio väestön altistuksesta
- jätteidenkäsittelysuunnitelma
- tarvittaessa suunnitelma onnettomuustilanteiden varalle (ei kuitenkaan yleensä tarpeen, kun merkkiaineen puoliintumisaika on pienempi kuin 120 vrk; riippuu myös merkkiainekokeeseen käytettävästä aktiivisuudesta).

Ohjeen mukaisesti radioaktiiviseksi jätteeksi voidaan laskea käytetty tai käyttämätön merkkiaine. Riippuen materiaalin puoliintumisajasta NRC antaa jätteen hävitykselle seuraavat vaihtoehdot:

- vanhentaminen säiliössä (vain jos puoliintumisaika on 120 vrk tai vähemmän)
- siirto viranomaisen hyväksymälle vastaanottajalle
- päästö viemäriin
- NRC:n myöntämä lupa vaihtoehtoiselle hävitystavalle
- päästöt muulle ”rajoittamattomalle alueelle” (unrestricted area) kuin viemäriin
- poltto
- pitkäaikainen tilapäisvarasto (kun puoliintumisaika on 120 vrk tai enemmän).

Ohjeessa ei ole tarkempaa määritelmää päästöille ”rajoittamattomalle alueelle” eikä niitä koskevia rajoituksia.

## 5 Päästöjä ja säteilyannoksia koskevat säädökset ja ohjeet

### 5.1 EU-säädökset ja -julkaisut

Säteilysuojelun perusperiaatteet ovat optimointi, oikeutus ja yksilönsuoja. Nämä perustuvat ICRP:n (International Commission on Radiological Protection) suosituksiin [21]. BSS-direktiivissä (Neuvoston direktiivi N:o 96/29/Euratom) on vahvistettu perusnormit, joilla työntekijöiden ja väestön terveyttä suojellaan ionisoivasta säteilystä aiheutuvilta vaaroilta [22].

Säteilyn käytöstä väestölle aiheutuva efektiivinen annos ei saa ylittää arvoa 1 mSv vuodessa. Optimointiperiaatteen toteuttamiseksi on tarvittaessa asetettava annosrajoituksia yhdestä säteilylähteestä aiheutuvan säteilyaltistuksen rajoittamiseksi siten, ettei eri lähteistä aiheutuva kokonaisannos ylitä annosrajaa. Sekä väestön että työntekijöiden säteilyaltistus on pidettävä niin vähäisenä kuin on käytännön toimenpitein mahdollista ottaen huomioon taloudelliset ja yhteiskunnalliset tekijät.

Toiminta tai siitä aiheutuvat päästöt voidaan vapauttaa valvonnasta ja ilmoitusvelvollisuudesta, jos kriittisen ryhmän edustajan efektiivinen annos on 10 µSv/v tai vähemmän ja toiminnasta aiheutuva kollektiivinen annos on korkeintaan 1 manSv/v, tai muuten voidaan osoittaa, että vapauttaminen on paras vaihtoehto.

Suomessa edellä mainitut BSS:n vaatimukset on pantu täytäntöön säteilylailla ja säteilyasetuksella [23,24].

Euroopan komission Radiation Protection -saran julkaisussa [25] käsitellään rutiinipäästöistä aiheutuvien kollektiivisten annosten laskentaa ja sitä miten tulokset tulisi esittää. Kollektiivisten annosten avulla voidaan laskea myös yksilöiden annokset. Tällöin tulokseksi saadaan kuitenkin tarkastelun kohteena olleen ryhmän jäsenen keskiarvoannos (per-caput dose; tietyn ryhmän kollektiivinen annos jaettuna ryhmän jäsenten lukumäärällä). Julkaisun liitteissä on esitetty tilastoja radioaktiivisten aineiden vuotuisista päästöistä

Sellafieldin ja La Hagen laitoksilta sekä laskelmia näistä aiheutuvista kollektiivisista ja per-caput-annoksista.

### 5.2 Radioaktiiviset jätteet ja päästöt säteilyn käytössä

Säteilyasetuksen 23 § mukaan silloin, jos toiminnan laatu edellyttää radioaktiivisten aineiden vähäisiä päästöjä ilmaan, viemäriverkkoon tai muutoin ympäristöön, on erityisesti varmistettava, että päästettävät ainemäärät pidetään STUKin asettamien raja-arvojen alapuolella ja niin pieninä kuin käytännöllisin toimenpitein on mahdollista. Ohjeessa ST 6.2 esitetään edellä mainitut raja-arvot sekä radioaktiivisten jätteiden käsittelyä koskevat säteilyturvallisuusvaatimukset [2].

Radioaktiivisten jätteiden käsittelyssä yleiset säteilyturvallisuusvaatimukset ovat seuraavat:

- Niin sanotun kriittisen ryhmän yksilön efektiivinen annos ei ylitä arvoa 10 µSv vuodessa. Kriittisellä ryhmällä tarkoitetaan väestöryhmää, jolle voidaan sen asuinpaikan ja elintapojen perusteella arvioida aiheutuvan suurimmat säteilyannokset.
- Yhden vuoden toiminnasta aiheutuva kollektiivisen efektiivisen annoksen sitouma ei ylitä arvoa 1 manSv.

Raja-arvoja sovelletaan erikseen kaasumaisten ja nestemäisten aineiden päästöille sekä kiinteille radioaktiivisille jätteille.

Toiminnan harjoittaja, joka aikoo päästää radioaktiivisia aineita viemäriverkkoon tai ilmaan taikka toimittaa kiinteitä radioaktiivisia jätteitä kaatopaikalle tai jätteenpolttolaitokseen, on velvollinen tekemään jätteiden käsittelysuunnitelman. Jätteiden käsittelysuunnitelma on esitettävä STUKille hyväksyttäväksi.

Jätteiden käsittelysuunnitelmaa ei tarvitse tehdä, jos jäte on ohjeen ST 6.2 kohdan 3.1 mukaista tavanomaista laboratoriojätettä, tai toiminta jär-



jestetään siten, että päästöissä ja kiinteiden jätteiden vaarattomaksi tekemisessä ei ylitetä ohjeen kohdissa 3.2–3.4 esitettyjä raja-arvoja. STUK voi tällöinkin määrätä poistoilman radioaktiivisuuden seurannan ja tulosten raportoinnin, jos se ympäristöolosuhteiden, työn laadun ja käytössä olevien radioaktiivisten aineiden laadun ja määrän vuoksi on tarpeen.

Viemäriverkkoon päästettäviä radioaktiivisia aineita koskevat aktiivisuusrajat (ohje ST 6.2, kohta 3.2) ovat seuraavat:

- Yhdellä kerralla viemäriverkkoon päästettävä aktiivisuus saa olla enintään  $2,5 \text{ ALI}_{\min}$ , mutta ei kuitenkaan suurempi kuin  $100 \text{ MBq}$ .
- Yhdestä säteilyn käyttöpaikasta kuukauden aikana viemäriverkkoon päästetty aktiivisuus saa olla enintään  $25 \text{ ALI}_{\min}$ . Vuoden aikana päästetty aktiivisuus ei saa kuitenkaan olla suurempi kuin  $100 \text{ GBq}$ .

Vuosisaantoraja ALI (Annual Limit on Intake) on saanto, josta aiheutuu vuosiannosrajan suuruinen efektiivisen annoksen kertymä.  $\text{ALI}_{\min}$ -arvo tarkoittaa kyseisen radionuklidin pienintä ALI-arvoa riippumatta radioaktiivisen aineen kemiallisesta muodosta ja kulkeutumistiestä kehoon. Arvon perustana on käytetty työntekijän vuosiannosrajaa  $20 \text{ mSv}$ .

Päästettäessä radioaktiivisia aineita ulkoilmaan päästöt on rajoitettava siten, että enimmäiskonsentraatio (MAC, Maximum Activity Concentration) päästöaukon välittömässä läheisyydessä (esim. muutaman metrin päässä poistoaукosta) on enintään yksi sadasosa säteilytyöntekijän hengitysilmalle johdetusta konsentraatio-rajasta (DAC, Derived Air Concentration) (ohje ST 6.2, kohta 3.3). Toiminnan aikana päästöistä aiheutuva aktiivisuuskonsentraatio lasketaan keskiarvona ajalle, joka saa olla enintään yhden vuoden pituinen.

Lyhytikäisiä radionuklideja (puoliintumisaika alle  $100 \text{ vrk}$ ) sisältävän jätteen vanhentaminen ja poistoilman suodattaminen on suositeltavaa myös silloin, kun jätteen aktiivisuus ja päästöt ovat annettujen raja-arvoja pienempiä.

Suomessa on asetettu laitoskohtainen päästö-  
raja yhdelle radioaktiivisten aineiden valmistajalle. Asetettu päästö-  
raja perustuu kriittisen ryhmän yksilölle aiheutuvan efektiivisen annoksen

arvioon. Radionuklidien  $^{14}\text{C}$  ja  $^{18}\text{F}$  yhteenlasketut päästöt on tällä laitoksella rajoitettu  $200 \text{ GBq}$ :iin vuodessa.

### 5.3 Päästöt ydinvoimalaitoksista

Ydinvoimaloiden päästöjä ja niistä aiheutuvia väestön annoksia koskevat vaatimukset on esitetty ohjeissa YVL 7.1 ja YVL 7.2 [26,27]. Ohjeessa YVL 7.3 esitetään vaatimukset ydinvoimalaitokselta ilma-  
kehään ja vesistöön päästettävien radioaktiivisten aineiden leviämisen laskennalliselle arvioinnille. Arvion perusteella varmistetaan, että ympäristön väestön säteilyaltistus on asetettujen turvallisuus-  
vaatimusten mukainen [28].

Normaaleissa käyttötilanteissa ja odotettavissa olevissa käyttöhäiriöissä tulee ohjeen YVL 7.1 mukaan käyttää seuraavia raja-arvoja (Valtioneuvoston päätös 1991/395, 9 ja 10 §) [26,29]:

- Ydinvoimalaitoksen vuoden mittaisesta normaalista käytöstä väestön yksilölle aiheutuvan annositouman raja-arvo on  $0,1 \text{ mSv}$ . Raja-arvon perusteella määritellään radioaktiivisten aineiden päästörajat ydinvoimalaitoksen normaalille käytölle.
- Odotettavissa olevan käyttöhäiriön seurauksena vuoden mittaisena ajanjaksona saatavasta ulkoisesta säteilystä ja samana aikana kehoon joutuvista radioaktiivisista aineista väestön yksilölle yhteensä aiheutuvan annoksen raja-arvo on  $0,1 \text{ mSv}$ .

Rajat koskevat väestön kriittisen ryhmän yksilölle aiheutuvaa annositoumaa ja efektiivistä annosta. Annositouma lasketaan 50 vuoden ajanjaksolle.

Ohjeessa YVL 7.2 esitetään ne periaatteet, joiden mukaan ydinvoimalan ympäristön väestön säteilyaltistus tulee arvioida [27]. Säteilyannoksien arviointiin käytettävien menetelmien on oltava luotettavia ja konservatiivisia. Käytettävät laskentaparametrit on valittava laitospaikan ympäristön olosuhteisiin soveltuviksi. Ydinvoimalaitoksen ympäristön asukkaiden säteilyannosten arviointiin käytetyissä malleissa ei voida ottaa täysin huomioon yksilöllisiä eroja ihmisten ominaisuuksissa ja elintavoissa. Tämän vuoksi tulee määritellä niin sanottu kriittinen ryhmä, jolle voidaan sen asuin-  
paikan ja elintapojen perusteella arvioida aiheutuvan suurimmat annokset. Annosrajoja verrataan tämän ryhmän annosten keskiarvoon.



Taulukossa II on esitetty, mitkä altistusreitit on otettava huomioon annoksia arvioitaessa ydinvoimalapäästön tapahtuessa normaalissa käyttötilanteessa tai häiriötilanteessa [27].

Ydinvoimalat raportoivat STUKille päästömitaustensa tulokset sekä omilla laskentaohjelmillaan tekemänsä arviot kriittisen ryhmän annoksista. Ydinvoimaloiden tekemien annosarvioiden oikeellisuuden varmistamiseksi STUKissa tehdään riippumattomat annosarviot VALTO-laskentaohjelman avulla [30]. STUK tekee kyseiset laskelmat ydinvoimaloiden toimittamien päästömittaustulosten ja säätietojen perusteella.

## 5.4 IAEA:n ohjeet

Radioaktiivisten aineiden ympäristöpäästöjen valvontaa käsitellään IAEA:n Safety Guide No. WS-G-2.3:ssa [31], jossa muun muassa annetaan yleisiä ohjeita päästörajien asettamiselle uusille lähteille tai vanhoille olemassa oleville lähteille. Ohje keskittyy vain sellaisiin päästöihin, joita syntyy tavanomaisissa säteilyn käyttötilanteissa silloin, kun kyseessä on jatkuva tai odotettu päästö. Päästöjen valvonnassa tulee ottaa huomioon periaatteet, jotka on esitetty kirjallisuusviitteissä [32,33,34].

Safety Guide No. WS-G-2.3:n [31] mukaan jätteenkäsittelyssä tulee huomioida ihmisten säteilysuojelun lisäksi myös muun ekosysteemin (eläimet ja eliöt, luonnonvarat, maa, metsät, vesi) suojelu säteilyn haitallisilta vaikutuksilta sekä tarvittaessa muutkin kuin säteilyvaikutukset. Säteilysuojelullisia seikkoja ohjeessa käsitellään kuitenkin vain ihmisten terveyden kannalta.

Ohjeen ehdotuksen mukaan viranomaiset voisivat esittää vuosittaiset ja lyhyen ajan päästörajat tietyille radionuklideille tai niiden painotetulle summalle. Päästörajat voitaisiin sisällyttää esimerkiksi lupaehtoihin.

Yleisiä malleja radioaktiivisten ympäristöpäästöjen vaikutusten arviointiin esitetään Safety Report No. 19:ssä [35]. Ympäristöpäästövaikutusten arvioinneissa tulee ottaa huomioon päästöt sekä ilmakehään, pintavesiin että jätevedenpuhdistamoille. Arvioinnissa huomioitavia seikkoja ovat muun muassa:

- päästöjen sisältämät radionuklidit
- päästökohdat ja päästöreitit (ilma, vesi, jätevedenpuhdistamot)
- päästöjen keskimääräiset pitoisuudet vuoden

ajalle laskettuna

- korkeus, jolta ilmapäästöt tapahtuvat (esim. päästöpiipun korkeus)
- sääolot (sade, tuulen voimakkuus ja suunta)
- radionuklidien kulkeutumisreitit pintavesissä (joki, järvi, meri)
- vesistön koko ja virtausolosuhteet
- sedimentoitumisprosessit
- radioaktiivinen hajoaminen sekä muut seikat jotka voivat aiheuttaa pitoisuuden pienenemistä vesistössä tai ilmassa.

Julkaisussa esitetyt mallinnustavat soveltuvat vain jatkuville tai pitkäaikaisille ympäristöpäästöille. Niitä ei voi käyttää äkillisille tai lyhyen ajan päästöille, jollaisia merkkiainekokeista aiheutuvat päästöt ovat.

Radioaktiivisten jätteiden käsittelystä annetaan yleisluonteisia ohjeita ja suosituksia Safety Guide No. WS-G-2.7:ssä [36]. Annosrajoituksia annettaessa tulee varmistaa, että annosrajat alittuvat myös, kun kaikki altistuslähteet otetaan huomioon, ja että yhdenkään kriittisen ryhmän yksilön annosraja ei ylity. Viranomaisen pitäisi asettaa rajoituksia ympäristöpäästöille julkaisussa Safety Guide No. WS-G-2.3 [31] annetun ohjeistuksen mukaisesti, siten että asetetut annosrajoitukset eivät ylity. Yhdenkään väestön jäsenen yhdestä säteilylähteestä saaman annoksen ei tulisi olla suurempi kuin 0,3 mSv vuodessa. Jos samalla alueella on useita radioaktiivisten aineiden käyttäjiä tai jätteenkäsittelylaitoksia, on annosrajoitukset tarvittaessa asetettava pienemmiksi, jotta väestön annosraja (1 mSv/v) ei ylity.

Rajoitukset voidaan asettaa tapauskohtaisesti tai yleisin perustein tehden konservatiivisia oletuksia [36]. Toiminnan harjoittajien pitäisi osoittaa vaatimusten toteutuminen valvomalla päästöjä ympäristömittauksin tai laskennallisoin keinoin. Mittaus- tai laskentamenetelmien tulisi olla viranomaisen hyväksymiä.

Päästö ympäristöön saattaa joskus olla suositeltava vaihtoehto radioaktiivisten aineiden hävittämiseksi, etenkin kun päästöt ovat kontrolloituja ja määrät pieniä ja sallituissa rajoissa [36]. Vähäisten ilmapäästöjen käsittely ei ole yleensä tarpeen. Tällaisia voi syntyä esimerkiksi lääketieteellisissä laboratorioissa, joissa käytetyt radioaktiiviset aineet ovat yleensä lyhytikäisiä, sekä pienissä tutkimuslaboratorioissa, joissa käytettävät mää-

rät ovat pieniä. Sen sijaan hiukkasia sisältävät päästöt pitää tarvittaessa puhdistaa ennen niiden päästämistä ilmaan.

Safety Guide No. WS-G-2.7 [36] mukaan toiminnan harjoittajan velvollisuus on:

- pitää muodostuvan jätteen määrä mahdollisimman vähäisenä
- panna toimeen turvallisuusarviointi, joka on suhteessa toiminnan laatuun ja ihmisten terveydelle ja ympäristölle aiheutuvan vaaran todennäköisyyteen
- pitää kirjaa jätteiden hävityksestä
- varmistaa että päästöjen valvonta, kirjaaminen ja raportointi viranomaiselle ovat tarpeeksi yksityiskohtaiset, jotta ne osoittavat jäteluvan ehtojen toteutumisen
- ilmoittaa viranomaiselle luvan mukaisten päästörajojen ylittymisestä
- tehdä vaaditut päästöilmoitukset.

## 5.5 OSPAR

1992 OSPAR Convention ohjaa Koillis-Atlantin meriympäristön suojeluun liittyvää kansainvälistä yhteistyötä. Kyseisessä sopimuksessa on yhdistetty 1972 Oslo Conventionissa (on dumping waste at sea) ja 1974 Paris Conventionissa (on land-based sources of marine pollution) sovitut ja niihin liittyvät asiat. Työtä johtaa OSPAR-komissio, johon kuuluvat edustajat 15 sopimuksen vahvistaneesta maasta sekä Euroopan komissiosta. Työ on jaettu kuuteen osa-alueeseen, joista yhtenä on radioaktiiviset aineet.

OSPAR-komission ministeritason kokouksessa vuonna 2003 on todettu tarve asettaa vertailutasot nykytilanteen perusteella päästöille, meriympäristön pitoisuuksille ja väestön annoksille [37]. Vaikeutena tällaisten tasojen asettamiselle on nähty muun muassa se, ettei ole olemassa luotettavaa tietoa radioaktiivisten aineiden päästöistä muun kuin ydinenergian käytön osalta eikä myöskään väestön annoksista. Meriympäristön kannalta merkittäviä ovat päästöt ydinvoimaloilta, NORM-päästöt (Naturally Occurring Radioactive Materials) sekä jossain määrin päästöt sairaaloista ja tutkimuslaboratorioista.

Radioaktiivisten aineiden päästöjä muun kuin ydinvoimateollisuuden osalta käsitellään OPSPAR-komission julkaisussa [17], johon on kerätty yhdeksän maan päästöjä koskevat säädök-

set. Tiivistelmä näistä on esitetty taulukossa III. Mereen päätyvien radioaktiivisten aineiden määrää ei ole arvioitu kyseisissä maissa (poikkeuksena ydinvoimalapäästöt). Yhtenä päästömuotona julkaisussa on mainittu merkkiainekokeet lyhytikäisillä radionuklideilla (esimerkiksi  $^{24}\text{Na}$  ja  $^{82}\text{Br}$ ).

## 5.6 Iso-Britannia

Ison-Britannian ympäristövirastot Environment Agency, Scottish Environment Protection Agency ja Department of Environment (Northern Ireland) sekä National Radiological Protection Board (NRPB) ja Food Standards Agency ovat joulukuussa 2002 antaneet (väliaikaisen) ohjeen radioaktiivisten ympäristöpäästöjen luvanvaraisuudesta [38]. Julkaisun tarkoituksena on antaa ohjeistusta sen arvioimiseksi, millaisia annoksia luovallisista ympäristöpäästöistä aiheutuu väestölle. Ongelmaksi Isossa-Britanniassa on koettu eri tahojen vaihtelevin menetelmin tekemät erilaiset annosarviot. Annosten arvioinnissa tulee huomioida eri säteilylajit ja eri altistumistiet. Ohjeessa on esitetty seuraavat annosrajat ja -rajoitukset:

- annosraja 1 mSv/v
- käyttöpaikkakohtainen annosrajoitus 0,5 mSv/v
- lähdekohtainen annosrajoitus 0,3 mSv/v
- kynnysarvo, jonka ylityksessä tehtävä tarkempi annosarvio 0,02 mSv/v
- vapautus/ei tarvetta valvonnalle  $\leq 0,01$  mSv/v.

Sää- ja ympäristöolosuhteet (esim. tuuliolosuhteet tai vesistöjen virtausmäärät) eivät pysy vakiona. Samoin oleskeluajat – esimerkiksi uiminen ja rannalla vietetty aika – vaihtelevat vuodenaikojen mukaan. Edellä mainittujen syiden vuoksi ajankohdasta riippuen lyhyenä aikana tapahtuvat radioaktiivisten aineiden ympäristöpäästöt voivat johtaa joko suurempaan tai pienempään kriittisen ryhmän kokonaisaltistukseen kuin saman päästön tapahtuessa tasaisesti pidemmän ajanjakson kuluessa. Esimerkiksi ilman sekoittumisen ollessa heikkoa voi äkillinen päästö saada aikaan suuria paikallisia aktiivisuuskonsentraatioita ja siten aiheuttaa suuremman annoksen kriittiselle ryhmälle.

Väestön annoksia arvioitaessa tulee ottaa huomioon seuraavat seikat:

- Maanviljelijät, kalastajat, jätevedenpuhdistus-

mojen työntekijät ja muut vastaavat pitää laskea väestön jäseniksi (ei suoraa hyötyä toiminnasta).

- Päästöjen oikeutus ja luvallisuus on ratkaistava kriittisen ryhmän annoksen mukaan.
- Eniten altistuva ikäryhmä tulee huomioida arvioissa.
- Kriittisen ryhmän annoksia tulee verrata annosrajoitukseen ja myös tulevaisuuden altistumistavat tulee ottaa huomioon.
- Myös muista lähteistä (historialliset ja tulevat) aiheutuvat altistukset pitää ottaa huomioon annosrajaan 1 mSv/v verrattaessa.
- Mikäli arvio kriittisen ryhmän annoksesta on suurempi kuin 0,02 mSv/v, tulee arviota tarkentaa.
- Tulevaisuuden kriittiset ryhmät on otettava huomioon.

Ohjeen [38] mukaan asianomaiset ympäristövirastot voivat antaa päästö- ja ilmoitusrajat myös vuotta lyhyemmille ajanjaksoille

NRPB:n julkaisun NRPB-W54 [39] mukaan päästöjen vaikutuksia arvioitaessa päästöjen oletetaan yleensä tapahtuvan jatkuvasti ja tasaisesti vuoden aikana. Ilmapäästöt saattavat kuitenkin kasvaa hetkellisesti myös normaalisti toimivilla laitoksilla, mikä voi johtaa erisuuruiseen säteilyannokseen kuin kokonaisaktiivisuudeltaan samansuuruinen tasainen päästö. Julkaisussa esitetään yleisiä arviointimenetelmiä lyhyen ajan ilmapäästöistä aiheutuville annoksille sekä tapausesimerkkejä erilaisilla päästöihin liittyvillä parametreilla (päästön määrä ja kesto, sääolot, tuulen suunta, asutuksen läheisyys jne.). Tapauksiin liittyviä annosarvioita on laskettu useiden eri radioaktiivisten aineiden päästöille, mutta ei merkkiainekokeissa yleisesti käytetyille lyhytikäisille nuklideille.

Ison-Britannian ympäristövirasto (Environment Agency) on asettanut mm. Amershamille, Sellafieldille ja Fawleylle laitoskohtaiset ilmoitus- tai päästörajat ilmapäästöjen osalta [39]. Näistä esim. Fawleyn päästörajana on  $5 \cdot 10^7$  Bq kuukaudessa tai  $6,0 \cdot 10^8$  Bq vuodessa (pois lukien  $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{125}\text{I}$ ,  $^{131}\text{I}$  ja alfasäteilijät, joille on annettu nuklidikohtaiset rajat).

NRPB:n julkaisussa NRPB-W63 [40] esitetään ohjeita pienille säteilyn käyttäjille säteilyturvallisuusarvioiden laatimiseen jätteiden hävittämisen osalta. Pieniksi käyttäjiksi lasketaan esim. yliopistot, sairaalat sekä lääketieteelliset ja teollisuuden tutkimuslaitokset. Julkaisussa on otettu tarkempaan käsittelyyn terveydenhuollossa käytettävät radionuklidit ( $^{99\text{m}}\text{Tc}$  ja  $^{131}\text{I}$ ) ja useissa käyttösovelluksissa hyödynnetyt  $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{32}\text{P}$ ,  $^{35}\text{S}$  ja  $^{125}\text{I}$ . Julkaisussa tarkastellaan sekä päästöjä vesistöön ja viemäriin että ilmapäästöjä. Laskelmat perustuvat enemmänkin tasaiseen päästöön kuin yksittäisiin päästöpulsseihin. Julkaisu toteaa monien jatkuvien päästöjen muodostuvan itse asiassa sarjasta lyhyitä päästöjä, mutta päästöjen säännöllisyyden vuoksi niitä voidaan usein käsitellä jatkuvana päästönä.

Julkaisussa NRPB-W63 [40] on omassa luvussaan käsitelty myös lyhyitä päästöjä ilmaan, joista esimerkkinä mainitaan teollisuuden merkkiainekokeet. Korkeintaan muutaman tunnin pituisena aikana tapahtuvien lyhyiden päästöjen osalta voidaan olettaa sääolosuhteiden pysyvän kutakuinkin muuttumattomina ja päästön kulkeutuvan kiinteään tuulen suuntaan. Esitetty arviointitapa on yksinkertaistettu ja mikäli se osoittaisi merkittäviä annoksia, tulisi tarkempi arviointi tehdä aiemmin mainitussa julkaisussa NRPB-W54 [39] esitetyllä tavalla.

**Taulukko II.** Tarkasteltavat altistusreitit, kun ydinvoimalapäästö tapahtuu ilmakehään tai vesistöön normaalissa käyttötilanteessa tai häiriötilanteessa [27].

Altistustapa	Päästö ilmakehään	Päästö vesistöön
Ulkoinen altistus	<ul style="list-style-type: none"> <li>• suora ja sironnut säteily laitoksella olevista säteilylähteistä ja kuljetuksista</li> <li>• päästöpilvessä olevista radioaktiivisista aineista</li> <li>• maahan laskeutuneista radioaktiivisista aineista</li> <li>• paljaalle iholle, hiuksille tai vaateukselle laskeutuneista aineista</li> <li>• ilmaan resuspensoituneista radioaktiivisista aineista</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• rannoille kertyneistä radioaktiivisista aineista</li> <li>• vedessä olevista radioaktiivisista aineista veneilyn tai uinnin aikana</li> </ul>
Sisäinen altistus	<ul style="list-style-type: none"> <li>• päästöpilvessä olevien radioaktiivisten aineiden hengityksestä</li> <li>• laskeumasta peräisin olevia radioaktiivisia aineita sisältävien kasvien käytöstä ravintona</li> <li>• radioaktiivisia aineita sisältävän maidon ja muiden eläinkunnan tuotteiden käytöstä ravintona</li> <li>• pintavesistöihin suoraan laskeutuneiden tai valunta-alueelta myöhemmin suotaautuvien radioaktiivisten aineiden aiheuttama altistus veden käytöstä juomavetenä tai vesikasvien ja -eläinten käytöstä ravintona</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• kalan sisältämistä radioaktiivisista aineista</li> <li>• hengityksen kautta; rannoille kertyneiden aineiden ilmaan resuspensoituvasta osasta tai purkuvesistön veden pörskymisestä ilmaan</li> <li>• juomaveden sisältämistä radioaktiivisista aineista, mikäli purkuvesistön vettä käytetään juomavetenä</li> <li>• elintarvikkeiden saastumisesta, joka seuraa purkuvesistön veden mahdollisesta käytöstä karjan juottamiseen sekä peltojen kasteluun</li> <li>• laidun- tai viljelysmaan ja tuotettujen elintarvikkeiden saastumisesta purkuvesistön veden pörskymisen tai muiden kertymistapojen kautta</li> </ul>

**Taulukko III.** Eri maiden päästösäädöksiä [17].

Maa	Säädökset
Saksa	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Väestön annos ei saa ylittää 0,3 mSv/v.</li> <li>• Vuosittaisia päästörajoja ei ole annettu erikseen.</li> <li>• Jätevesille on annettu radionuklidikonsentraatorajat olettamalla, että se olisi ainoa juomaveden lähde (esim. <sup>131</sup>I:lle raja on 7 Bq/l).</li> </ul>
Irlanti	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Luvassa määritelty radioaktiivisen aineen vuosittainen enimmäiskäyttömäärä ja päästöraja.</li> </ul>
Luxemburg	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ei ilmoitusvelvollisuutta päästöjen suuruudesta.</li> </ul>
Alankomaat	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Päästörajat nesteille ja kaasuille annetaan luvissa.</li> <li>• Laboratorioille päästörajat annetaan radiotoksisuusekvivalentteina (Re). 1 Re tarkoittaa sitä aktiivisuusmäärää tiettyä nuklidia, joka aiheuttaa hengitettynä tai nieltynä 1 Sv:n annoksen.</li> <li>• Muille laitoksille rajat annetaan kullekin käytetylle radionuklidille erikseen (Bq/v).</li> </ul>
Norja	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Päästömääriä ei tarvitse raportoida erikseen.</li> <li>• Radioaktiivisten aineiden ostoista tulee ilmoittaa kokonaismäärät kunkin radionuklidin kohdalta erikseen.</li> <li>• Päästöt jätevedenpuhdistamoon määriteltyjen rajojen mukaan.</li> </ul>
Espanja	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Päästörajat riippuvat olosuhteista ja on asetettu luvassa erikseen.</li> <li>• Viemäripäästöille rajana on pääsääntöisesti, ettei juomavetenä käyttäen siitä aiheutuva annos ylittäisi 5 mSv/v.</li> </ul>
Ruotsi	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Laboratoriotyöskentelyssä yhdellä kerralla viemäriverkkoon päästettävä aktiivisuus saa olla enintään 1 ALI<sub>min</sub>, mutta ei kuitenkaan suurempi kuin 100 MBq.</li> <li>• Kuukauden aikana viemäriverkkoon päästetty aktiivisuus saa olla enintään 10 ALI<sub>min</sub>.</li> </ul>
Sveitsi	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Viranomainen asettaa tapauskohtaisesti päästörajat ja -konsentraatiot siten, etteivät lähdekohtaiset annossuosituksat ylity.</li> </ul>
Iso-Britannia	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Käyttöpaikkakohtaiset päästörajat annetaan luvassa siten, ettei kriittisen ryhmän yksilön annos ylitä 0,5 mSv/v:n annosrajoitusta.</li> <li>• Ehdollinen vapautus luvasta, jos väestön annos vähäpätöinen (&lt;10 µSv/v).</li> <li>• Päästömääristä tulee raportoida.</li> </ul>

## 6 Päästöistä aiheutuvan säteilyaltistuksen arvioiminen

### 6.1 Yleistä

Teollisuuden merkkiainekokeista aiheutuvia ympäristöpäästöjä ja niistä aiheutuvia säteilyannoksia arvioitaessa tulee huomioida päästöt ilmaan ja vesistöihin sekä tarvittaessa päästöt viemäriverkkoon. STUK on soveltanut merkkiainekokeista aiheutuville päästöille annosrajaa  $10 \mu\text{Sv/v}$  (kriittisen ryhmän yksilön efektiivinen annos). Tarvittaessa vaatimuksen toteutuminen on osoitettava laskennallisesti ja/tai päästömittauksin.

Yleispeiteviä merkkiainekokeisiin sovellettavia nuklidikohtaisia ympäristöpäästörajoja ei voi asettaa, koska kriittisen ryhmän yksilön annos riippuu vallitsevista olosuhteista, jotka merkkiainekoetoinnassa vaihtelevat suuresti mm. kokeiden suorituspaikasta riippuen.

Päästöistä aiheutuvan annoksen arvioimisessa voidaan käyttää apuna esimerkiksi seuraavia menetelmiä:

- Vertailu ohjeen ST 6.2 mukaisiin päästörajoihin (päästöt ilmaan ja viemäriverkostoon). Viemäripäästörajojen osalta vertailu ei kuitenkaan anna oikeaa kuvaa, koska rajoittavana tekijänä on puhdistamotyöntekijän annos, kun taas teollisuuden merkkiainekokeissa päästö tapahtuu suoraan ympäristöön.
- Päästömittauksiin ja erilaisiin laskentamalleihin perustuvat annosarviot.
- Ydinvoimalapäästöistä aiheutuvien annosten arvioimiseen käytettävien laskentamallien hyödyntäminen.

### 6.2 Vertailu ohjeen ST 6.2 ilmapäästörajoihin

Ohjeen ST 6.2 mukaan päästettäessä radioaktiivisia aineita ulkoilmaan, on päästöt rajoitettava siten, että enimmäiskonsentraatio (MAC) päästöaukon välittömässä läheisyydessä (esim. muutaman metrin päässä poistoaukosta) on enintään yksi sadasosa säteilytyöntekijän hengitysilmalta johdetusta konsentraatorajasta (DAC) [2]. Toiminnan

aikana päästöistä aiheutuva aktiivisuuskonsentraatio lasketaan keskiarvona ajalle, joka saa olla enintään yhden vuoden pituinen.

Merkkiainekokeissa päästö on kertaluonteinen. MAC-arvon hetkellinen ylittyminen kokeen aikana voi olla mahdollista, mutta kriittisen ryhmän yksilön annos saattaa silti jäädä selvästi alle  $10 \mu\text{Sv}$  vuodessa. Asiaa voi karkeasti arvioida laskemalla päästön aktiivisuuskonsentraatio keskiarvona vuoden ajalle. Tällainen tarkastelu ei kuitenkaan anna täysin luotettavaa kuvaa päästöstä aiheutuneesta annoksesta, koska päästöhetken olosuhteet saattavat poiketa oleellisesti vuoden keskimääräisistä sääolosuhteista.

Koska merkkiainekokeet ovat teollisuuslaitoksissa satunnaisia, ei näiden varalta ole järjestetty erillisiä päästömittauksia. Tämän vuoksi radioaktiivisen aineen konsentraatio joudutaan arvioimaan muilla menetelmillä. Lähemmän tarkastelun kohteeksi otetaan  $^{82}\text{Br}$ , koska muita taulukossa I esitettyjä radionuklideja ei juuri käytetä sellaisissa käyttösovelluksissa, joissa niistä voisi aiheutua oleellisia päästöjä ulkoilmaan (ks. kohta 2.2).

Merkkiainekokeissa suurin kokeeseen varattu  $^{82}\text{Br}$ :n aktiivisuus on ollut  $40 \text{ GBq}$  (kaasumainen etyylibromidi). MAC-arvo  $^{82}\text{Br}$ :lle on  $100 \text{ Bq/m}^3$  [2]. Konservatiivisella olettamalla, jossa koko määrä pääsisi prosessista ulkoilmaan ilman merkittävää viipymää, alittuu MAC-arvo vuoden keskiarvona laskettuna, jos poistoilman yhteenlaskettu tilavuus vuoden aikana on vähintään  $400 \text{ miljoonaa m}^3$ . Mikäli tämä poistoilman määrä ylittyy, voidaan olettaa, että vuoden keskiarvolle laskettuna MAC-arvo ei voi normaalitilanteissa ylittyä merkkiainekokeen vuoksi.

Mikäli poistoilman määrä alittaisi edellä mainitun lukeman, on tarvittaessa arvioitava tarkemmin päästön todellinen aktiivisuus tai arvioitava väestölle aiheutuva annos käyttäen erilaisia laskentamenetelmiä (ks. kohta 6.3).



## 6.3 Mallinnukset

Annosarvioihin käytettävät mallinnustavat sopivat yleensä paremmin jatkuville päästöille ja kiinteästi toimiville laitoksille kuin lyhyille satunnaisille päästöille. Luotettavat mallinnukset vaativat tuekseen mielellään päästömittausten tulokset.

Merkkiainekokeiden päästöistä aiheutuvien annosten arviointiin vaikuttavat seikat vaihtuvat koetilanteesta toiseen eikä merkkiainekokeissa tehdä päästömittauksia. Luotettavaan annosarvioon tarvittava tieto on radioaktiivisen merkkiaineen määrä sen päästessä ympäristöön. Tätä voidaan arvioida esimerkiksi sen perusteella, mikä kokeeseen käytetty aktiivisuus on ja kuinka pitkä merkkiaineen viipymäaika prosessissa on (aktiivisuuden pieneneminen radioaktiivisen hajoamisen seurauksena).

Kohdassa 6.3.1 on esitetty kaavat, joita on käytetty radioaktiivisten aineiden päästöistä aiheutuvien annosten laskemiseen. Ydinvoimalapäästöjen annosarviointiin käytetyllä VALTO-ohjelmalla tehty laskelma on esitetty kohdassa 6.3.2.

### 6.3.1 Radioaktiivisten aineiden päästöistä ulkoilmaan aiheutuvan säteilyaltistuksen arvioiminen

Radioaktiivisten aineiden päästöistä ulkoilmaan aiheutuvan kriittisen ryhmän yksilön efektiivisen annoksen sitouman (D) arvioimiseksi on käytetty mm. seuraavia kaavoja:

$$D = C \cdot 20 \text{ mSv/DAC}, \quad (1)$$

missä

DAC on säteilytyöntekijän hengitysilhalle johdettu konsentraatioraja ( $\text{Bq/m}^3$ )

C on keskimääräinen hengitysilmapitoisuus päästökohdan ympäristössä ( $\text{Bq/m}^3$ )

20 mSv on annosraja säteilytyötä tekevän työntekijän efektiiviselle annokselle vuodessa (keskiarvo viiden vuoden aikana)

$$C = q \cdot \bar{G}_i, \quad (2)$$

missä

q on keskimääräinen päästönopeus ( $\text{Bq/s}$ )

$\bar{G}_i$  on vuoden keskimääräinen meteorologinen laimenemiskerroin ( $\text{s/m}^3$ ), jossa on otettu huomioon myös tuulen suunnan vaihtelut.

Arviointimenetelmiä ja laskentamalleja aineiden kulkeutumisesta ilmassa ja päästöistä ai-

heutuvien annosten laskemiseksi on esitetty mm. STUKin julkaisussa *Säteily ympäristössä* [41], NCRP:n (National Council on Radiation Protection and Measurements) raporteissa No. 123 I ja II [42,43] sekä Faw'n ja Shultisin julkaisussa *Radiological Assessment: Sources and Exposures* [44].

Eri laskentamalleja ja muuttujien arvoja käyttäen voidaan päätellä, että merkkiainekokeiden päästöistä ulkoilmaan kriittisen ryhmän jäsenelle aiheutuva efektiivinen annos on pahimmassakin tapauksessa alle 10  $\mu\text{Sv}$  vuodessa.

### 6.3.2 Ydinvoimalapäästöistä aiheutuvien annosten arvioimiseen käytetty laskentaohjelma

Ydinvoimaloiden päästöjen valvonnassa käytetään vertailuarvona väestön yksilölle arvoa 0,1 mSv/v [26]. Ydinvoimaloiden ympäristön päästömittausten ja rekisteröityjen sääolosuhteiden (tuulen suunta ja voimakkuus, ilman lämpötila, ilmanpaine, ilman suhteellinen kosteus, sademäärä ja -aika jne.) perusteella ydinvoimalat tekevät annosarvion. Annosarvioiden oikeellisuuden varmistamiseksi laskenta suoritetaan myös STUKissa erillisellä laskentaohjelmalla (VALTO) [30]. Ohjelmaan on syötetty yleisimpien radionuklidien tiedot (yhteensä 10 parametria). Myös  $^{82}\text{Br}$ :n tiedot löytyvät ohjelmasta.

Ohjelman avulla tehtiin laskelmat  $^{82}\text{Br}$ -päästöistä aiheutuville annoksille (kriittisen ryhmän yksilön annos ja kollektiivinen annos) seuraavilla olettamuksilla:

- Annos arvioitiin lisäämällä  $^{82}\text{Br}$ -päästö mukaan ydinvoimalan annoslaskelmaan (vuoden 2005 kolmas vuosineljännes) ja vähentämällä saadusta arvosta ydinvoimalan alkuperäinen annosarvio.
- Arvio tehtiin päästö määrällä 40 GBq sekä Loviisan että Olkiluodon ydinvoimaloiden parametreilla. Konservatiivisen annosarvion saamiseksi päästö määräksi valittiin suurin tiedossa oleva Suomessa merkkiainekokeissa käytettävä  $^{82}\text{Br}$ -määrä (suurin yhteen merkkiainekokeeseen varattu aktiivisuus).
- Asutus- ja väestömäärätiedot ja kriittisen ryhmän määritelmä oletettiin samaksi kuin ydinvoimaloiden ympäristössä.
- Laskennassa käytettiin ydinvoimalaympäristön

sääolosuhteita ja leviämisreittejä (mm. tuulen suunta ja keskimääräinen laimennustekijä).

- Arvio tehtiin päästöille sekä vesistöön että ilmaan.

Laskelman tulokset on esitetty taulukossa IV [45]. Tulosten perusteella suurin arvioitu kriittisen ryhmän yksilön annos oli 0,025  $\mu\text{Sv}$  ja kollektiivinen annos 0,0007 manSv (päästö ilmaan Olkiluodon ympäristössä).

Laskelman mukaan suurin osa annoksesta aiheutuu ulkoisesta säteilystä. Päästöissä veteen sisäisen altistuksen osuus oli vain 2–5 % annoksesta. Ilmapäästöjen osalta sisäisen annoksen osuus oli 9 % yksilön annoksesta ja 17 % kollektiivisesta annoksesta. Sisäistä annosta muodostuu lähinnä

siltoin, kun ihminen altistuu hengityksen kautta päästöjen tapahtuessa ilmaan. Koska merkkiaineina käytetyt nuklidit –  $^{82}\text{Br}$  mukaan lukien – ovat lyhytikäisiä, niiden kulkeutuminen esimerkiksi ravintoon on ymmärrettävästi vähäistä.

Ydinvoimalat sijaitsevat melko etäällä asutuksesta. Merkkiainekokeen ollessa kyseessä väestöä saattaa asua lähempänä teollisuuslaitosta ja sääolosuhteet voivat olla epäedullisemmat kuin esimerkkilaskelmassa (esim. päästöjen laimeneminen heikompaa). Annosarvio on kuitenkin laadittu erittäin konservatiivisten aktiivisuusolettamuksien perusteella ja niiden perusteella merkkiaineesta aiheutuva annos olisi esimerkkitapauksessa mitättömän pieni.

**Taulukko IV.** Laskelma kriittisen ryhmän yksilön annoksesta sekä kollektiivisesta annoksesta, joka aiheutuisi 40 GBq:n  $^{82}\text{Br}$ -päästöstä veteen tai ilmaan Loviisan tai Olkiluodon ydinvoimalan ympäristössä. Ulkoisen ja sisäisen annoksen suhteelliset osuudet on esitetty prosentteina [45].

Kriittisen ryhmän yksilön annos	Loviisa	Olkiluoto
Päästöt veteen		
Ulkoisen annos ( $\mu\text{Sv}$ )	$9,8 \cdot 10^{-4}$ (97 %)	$1,1 \cdot 10^{-3}$ (95 %)
Sisäinen annos ( $\mu\text{Sv}$ )	$2,9 \cdot 10^{-5}$ (3 %)	$5,8 \cdot 10^{-5}$ (5 %)
Annos yhteensä ( $\mu\text{Sv}$ )	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$
Päästöt ilmaan		
Ulkoisen annos ( $\mu\text{Sv}$ )	$9,4 \cdot 10^{-3}$ (91 %)	$2,3 \cdot 10^{-2}$ (91 %)
Sisäinen annos ( $\mu\text{Sv}$ )	$9,7 \cdot 10^{-4}$ (9 %)	$2,4 \cdot 10^{-3}$ (9 %)
Annos yhteensä ( $\mu\text{Sv}$ )	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$2,5 \cdot 10^{-2}$
Kollektiivinen annos		
Päästöt veteen		
Ulkoisen annos (manSv)	$6,6 \cdot 10^{-7}$ (98 %)	$1,3 \cdot 10^{-6}$ (96 %)
Sisäinen annos (manSv)	$1,4 \cdot 10^{-8}$ (2 %)	$5,4 \cdot 10^{-8}$ (4 %)
Annos yhteensä (manSv)	$6,8 \cdot 10^{-7}$	$1,4 \cdot 10^{-6}$
Päästöt ilmaan		
Ulkoisen annos (manSv)	$6,0 \cdot 10^{-5}$ (83 %)	$5,9 \cdot 10^{-4}$ (83 %)
Sisäinen annos (manSv)	$1,2 \cdot 10^{-5}$ (17 %)	$1,2 \cdot 10^{-4}$ (17 %)
Annos yhteensä (manSv)	$7,2 \cdot 10^{-5}$	$7,0 \cdot 10^{-4}$



## 7 Johtopäätökset

Selvityksen perusteella nimenomaan merkkiainekokeita ja niistä aiheutuvia päästöjä koskevia määryksiä ei juuri ole olemassa. Merkkiainekokeiden valvonta toteutetaan useimmissa maissa soveltaen vaatimuksia, jotka on annettu avolähteiden käytölle laboratorioissa. Merkkiainekoetointia koskevat ohjeet keskittyvät pääsääntöisesti kokeiden tekniseen toteutukseen eivätkä niinkään säteily-suojeluun.

Merkkiainekoetoinnassa – kuten kaikessa säteilytoiminnaissa – tulee noudattaa säteilysuojelun perusperiaatteita. Kokeet on suunniteltava ja toteutettava siten, että oikeutus- ja optimointiperiaatteet toteutuvat eivätkä annosrajat ylitä. Optimointiperiaatteen mukaisesti merkkiaineksi tulee valita sopivista radionuklideista säteilyominaisuuksiltaan vaarattomin, ja käyttää niin pientä aktiivisuutta kuin kokeen kannalta on mahdollista. Merkkiainekokeet on suunniteltava siten, että työntekijöiden ja väestön altistuminen on mahdollisimman vähäistä ja koeympäristön kontaminointuminen saadaan estettyä.

Ympäristöpäästöjen sallittuja määriä arvioitaessa on otettava huomioon annosrajat ja -rajoitukset. Annosarvioinnissa tulee tarkastella päästöjä ilmaan ja vesistöihin sekä tarvittaessa viemäriin. Mikäli radioaktiivista merkkiainetta jää teollisuusprosessissa itse tuotteeseen, on tehtävä erillinen arviointi sen säteilyvaikutuksista sekä tarpeista vanhentaa tuotetta ennen jatkojalostusta tai markkinoille päästämistä. Radioaktiivisten jätteiden päästäminen ympäristöön ei saa olla ensisijainen hävitysmuoto, jollei se ole perusteltua säteilysuojelluiselta kannalta tai teknisten seikkojen vuoksi. Tällöinkin niitä tulee mahdollisuuksien mukaan ensin vanhentaa.

Merkkiainekokeista aiheutuvien päästöjen oikeutusta arvioidaan yleisesti annosarvion pohjalta. Päästörajat perustuvat yleensä kriittisen ryhmän yksilön annokseen. Joissakin maissa vertailukohtana käytetään lähdekohtaista annosrajoi-

tusta 0,3 mSv vuodessa [46]. Suomessa STUK on soveltanut päästöistä kriittisen ryhmän yksilölle aiheutuvan annoksen raja-arvona 10 µSv vuodessa. Ydinvoimalapäästöille käytetään vastaavana raja-arvona 0,1 mSv vuodessa.

Radionuklidikohtaisten yleisten päästörajoiden antaminen ei ole mahdollista, sillä päästöistä aiheutuva annos riippuu kulloisistakin olosuhteista. Kiinteästi toimiville laitoksille annosarvioiden perusteella asetetut nuklidikohtaiset päästörajat ovat helpommin sovellettavissa. Kirjallisuudesta ei löytynyt tapauksia, joissa merkkiainekokeita tekevälle yritykselle olisi asetettu omat päästörajansa.

Luotettavaan annosarvioon tarvitaan monia tietoja, jotka eivät pysy vakiona merkkiainekokeesta ja koeympäristöstä toiseen. Tällaisia ovat esimerkiksi päästön aktiivisuus, asutuksen läheisyys ja sääolosuhteet. Kohdissa 6.3.1 ja 6.3.2 esitettyihin laskentamalleihin perustuvat laskelmat tukevat aiempia laskelmia siinä, että tavanomaisissa merkkiainekokeissa kriittisen ryhmän yksilön efektiivinen annos ei ylitä 10 µSv:ä vuodessa. Päästöistä aiheutuvat säteilyannokset ovat vähäisiä myös poikkeavissa tilanteissa.

Jotta STUKissa voitaisiin tarkemmin arvioida, täytyvätkö päästöille asetetut vaatimukset, tulisi toiminnan harjoittajan sisällyttää kohdassa 3.2 mainittuihin ilmoituksiin esimerkiksi seuraavat tiedot:

- referenssipäivämäärä ilmoitetulle aktiivisuudelle
- arvio merkkiaineen viipymästä prosessissa ja sen perusteella tehty arvio päästöistä ympäristöön
- ilmapäästöjen osalta arvio aktiivisuuspitoisuudesta poistoilmassa (vertailu MAC-arvoon)
- päästettäessä radioaktiivisia aineita vesistöön, arvio aktiivisuuspitoisuudesta poistovedessä.

Tulisi myös harkita, pitäisikö toiminnan harjoittajalta edellyttää jälkikäteen raporttia kokeiden ku-

lusta. Raportti voisi sisältää esimerkiksi tarkemmat tiedot mittauksiin käytetystä aktiivisuudesta ja päästöjen määrästä, kontaminaatiomittausten tulokset, tiedot jätteiden hävityksestä sekä tiedot mahdollisista kokeiden aikana ilmenneistä ongelmista.

Joissakin tapauksissa voi olla perusteltua, että toiminnan harjoittaja laatii kuvauksen mahdol-

lisista poikkeavista tapahtumista ja arvion ympäristön asukkaiden säteilyaltistuksesta ennen merkkiainekokeiden suorittamista. Selvitys voi olla tarpeen etenkin silloin, jos kyseessä on tavanomaisista rutiineista poikkeava merkkiainekoe esimerkiksi käytettyjen aktiivisuuksien ja radionuklidien tai poikkeuksellisen koeympäristön vuoksi.

# Kirjallisuusviitteet

- 1 STUK. Radionuklidilaboratorioiden säteilyturvallisuuksvaatimukset. Ohje ST 6.1. Säteilyturvakeskus (1.10.1999).
- 2 STUK. Radioaktiiviset jätteet ja päästöt. Ohje ST 6.2. Säteilyturvakeskus (1.10.1999).
- 3 STUK. Säteilyn käytön vapauttaminen turvallisuusluvasta ja ilmoitusvelvollisuudesta. Ohje ST 1.5. Säteilyturvakeskus (1.7.1999).
- 4 STUK. Säteilytoiminnan turvallisuusperusteet. Ohje ST 1.1. Säteilyturvakeskus (23.5.2005).
- 5 STUK. Säteilysuojelutoimet työpaikalla. ST 1.6. Säteilyturvakeskus (29.12.1999).
- 6 Puukko E ja Jaakkola T. Kenttäkelpoisen  $^{137}\text{Cs}/^{137}\text{mBa}$ -generaattorin kehittäminen. Loppuraportti 31.3.1985. Helsingin yliopiston radiokemian laitos; 1985.
- 7 International Atomic Energy Agency. Radiotracer Applications in Industry – A Guidebook. Technical Reports Series No. 423. Vienna: International Atomic Energy Agency; 2004.
- 8 International Atomic Energy Agency. Guidebook on Radioisotope Tracers in Industry. Technical Reports Series No. 316. Vienna: International Atomic Energy Agency; 1990.
- 9 International Atomic Energy Agency. Laboratory Manual on the Use of Radiotracer Techniques in Industry and Environmental Pollution. Technical Reports Series No. 161. Vienna: International Atomic Energy Agency; 1975.
- 10 International Atomic Energy Agency. Radiotracer Technology as Applied to Industry. Final report of a co-ordinated research project 1997-2000. IAEA TECDOC Series No. 1262. Vienna: International Atomic Energy Agency; 2001.
- 11 International Atomic Energy Agency. Integration of Tracing with Computational Fluid Dynamics for Industrial Process Investigation. Final report of a co-ordinated research project 2001-2003. IAEA TECDOC Series No. 1412. Vienna: International Atomic Energy Agency; 2004.
- 12 International Atomic Energy Agency. Safety Assessment Plans for Authorization and Inspection of Radiation Sources. IAEA TECDOC Series No. 1113. Vienna: International Atomic Energy Agency; 1999.
- 13 International Atomic Energy Agency. Radiation Protection and the Management of Radioactive Waste in the Oil and Gas Industry. Safety Reports Series No. 34. Vienna: International Atomic Energy Agency; 2003.
- 14 Statens Institut for Strålehygiejne. Vejledning om lækagesporing med Br-82. Sundhedsstyrelsen; 2004 (tanskaksi).
- 15 Kolbak Dorthe. Henkilökohtainen tiedonanto. Statens Institut for Strålebeskyttelse (SIS), sähköpostiviestit 22.11.2005 ja 25.11.2005.
- 16 Sundhedsstyrelsen. Bekendtgørelse nr. 954 af 23. oktober 2000 (tanskaksi).
- 17 OSPAR Commission. Discharges of Radioactive Substances into the Maritime Area by Non-Nuclear Industry. Radioactive Substances Series. OSPAR Commission; 2002.

- 18 Statens Strålevern (NRPA). Godkjenning av virksomhet for bruk av åpne radioaktive kilder til sporundersøkelser utenfor laboratorium (tracerundersøkelser) (norjaksi).
- 19 Statens Strålevern (NRPA). Godkjennings-skjema: Kategori O – Utslipp av radioaktive stoffer (norjaksi).
- 20 Whitten JE, Courtemanche SR, Jones AR, Penrod, RE and Fogle DB (prepared by). Consolidated Guidance About Materials Licenses: Program-Specific Guidance About Well Logging, Tracer, and Field Flood Study Licenses, Final Report. NUREG-1556, Vol. 14. Washington: U.S. Nuclear Regulatory Commission; June 2000.
- 21 International Commission on Radiological Protection. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. Oxford: Pergamon Press; 1991.
- 22 Neuvoston direktiivi N:o 96/29/Euratom, annettu 13 päivänä toukokuuta 1996, perusnormien vahvistamisesta työntekijöiden ja väestön terveyden suojelemiseksi ionisoivasta säteilystä aiheutuvilta vaaroilta. Euroopan yhteisöjen virallinen lehti, L159, 39. vuosikerta, 29. kesäkuuta 1996.
- 23 Säteilylaki 27.3.1991/592.
- 24 Säteilyasetus 20.12.1991/1512.
- 25 Smith KR, Bexon AP, Sihra K, Simmonds JR, Lochard J, Schneider T and Bataille C. Guidance on the calculation, presentation and use of collective doses for routine discharges. Radiation Protection Issue N° 144. Luxembourg: European Commission; 2006.
- 26 STUK. Ydinvoimalaitoksen ympäristön säteilyaltistuksen ja radioaktiivisten aineiden päästöjen rajoittaminen. Ohje YVL 7.1. Säteilyturvakeskus (14.12.1992).
- 27 STUK. Ydinvoimalaitoksen ympäristön väestön säteilyannosten arviointi. Ohje YVL 7.2. Säteilyturvakeskus (1.3.1997).
- 28 STUK. Ydinvoimalaitoksen radioaktiivisten aineiden päästöjen leviämisen laskennallinen arviointi. Ohje YVL 7.3. Säteilyturvakeskus (23.1.1997).
- 29 Valtioneuvoston päätös ydinvoimalaitosten turvallisuutta koskevista yleisistä määräyksistä 14.12.1991/395.
- 30 Blomqvist L ja Kara M. VALTO-tietokoneohjelma ydinvoimalaitosten ympäristön säteilyannosten tarkistuslaskuja varten. STL-B-TUTO-17. Helsinki: Säteilyturvallisuuslaitos; 1982.
- 31 International Atomic Energy Agency. Regulatory Control of Radioactive Discharges to the Environment: Safety Guide. Safety Standards Series No. WS-G-2.3. Vienna: International Atomic Energy Agency; 2000.
- 32 International Atomic Energy Agency. The Principles of Radioactive Waste Management. Safety Series No. 111-F. Vienna: International Atomic Energy Agency; 1995.
- 33 Food and Agriculture Organization of the United Nations, International Atomic Energy Agency, International Labour Organisation, OECD Nuclear Energy Agency, Pan American Health Organization. Radiation Protection and the Safety of Radiation Sources. Safety Series No. 120. Vienna: International Atomic Energy Agency; 1996.
- 34 International Atomic Energy Agency. International Basic Safety Standards for Protection Against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources. Safety Series No. 115. Vienna: International Atomic Energy Agency; 1996.
- 35 International Atomic Energy Agency. Generic Models for Use in Assessing the Impact of Discharges of Radioactive Substances to the Environment. Safety Reports Series No. 19. Vienna: International Atomic Energy Agency; 2001.
- 36 International Atomic Energy Agency. Management of Waste from the Use of Radioactive

- Material in Medicine, Industry, Agriculture, Research and Education: Safety Guide. Safety Standards Series No. WS-G-2.7. Vienna: International Atomic Energy Agency; 2005.
- 37 OSPAR Commission. Ministerial Meeting of the OSPAR Commission. 2003 Progress Report on the More Detailed Implementation of the OSPAR Strategy with Regard to Radioactive Substances. Bremen: 25 June 2003. Summary Record OSPAR 03/17/1-E, Annex 30.
- 38 Environment Agency, Scottish Environment Protection Agency, Department of Environment (Northern Ireland), National Radiological Protection Board & Food Standards Agency. Authorisation of Discharges of radioactive Waste to the Environment: Principles for the Assessment of Prospective Public Doses. Interim Guidance; December 2002 (väliaikainen ohje).
- 39 Smith JG, Bedwell P, Walsh C and Haywood SM. Methodology for Assessing Doses from Short-Term Planned Discharges to Atmosphere. NRPB-W54. Chilton: National Radiological Protection Board; March 2004.
- 40 McDonnell CE. Radiological Assessment for Small Users. NRPB-W63. Chilton: National Radiological Protection Board; October 2004.
- 41 Pöllänen R (toim.). Säteily ympäristössä. Helsinki: Säteilyturvakeskus; 2003.
- 42 Screening Models for Releases of Radionuclides to Atmosphere, Surface Water, and Ground. NCRP Report No. 123 I. Bethesda: National Council on Radiation Protection and Measurements; 1996.
- 43 Screening Models for Releases of Radionuclides to Atmosphere, Surface Water, and Ground – Work Sheets. NCRP Report No. 123 II. Bethesda: National Council on Radiation Protection and Measurements; 1996.
- 44 Faw RE and Shultis JK. Radiological Assessment: Sources and Exposures. Englewood Cliffs, New Jersey: PTR Prentice-Hall Inc.; 1993.
- 45 Klemola Seppo. Laskelma  $^{82}\text{Br}$ -päästön aiheuttamasta säteilyannoksesta ydinvoimalaympäristössä. Voimayhtiöiden annoslaskujen tarkistusohjelma – VALTO 900101. Säteilyturvakeskus (27.12.2005).
- 46 The International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 77, Radiological protection policy for the disposal of radioactive waste. Annals of the ICRP Volume 27 (Supplement). Oxford: Pergamon; 1997.

## STUK-B sarjan julkaisuja

**STUK-B 83** Venelampi E. Radioaktiivisten aineiden käyttö teollisuuden merkkiainekokeissa.

**STUK-B 82** Rantanen E (ed.) Radiation practices. Annual report 2006.

**STUK-B 81** Safety assessment of the Loviisa nuclear power plant. Statement regarding the licence application by Fortum Power and Heat Oy concerning the operation of the Loviisa nuclear power plant.

**STUK-B 80** Finnish report on nuclear safety. Finnish 4th national report as referred to in Article 5 of the Convention on Nuclear Safety.

**STUK-B 79** Kainulainen E (ed.). Regulatory control of nuclear safety in Finland. Annual report 2006.

**STUK-B 78** Isaksson R (toim.). Säteily- ja ydinturvallisuus. Neljännesvuosiraportti 1/2007.

**STUK-B 77** Mustonen R (toim.). Ympäristön säteilyvalvonta Suomessa. Vuosiraportti 2006. – Strålningsövervakning av miljön i Finland. Årsrapport 2006. – Surveillance of Environmental Radiation in Finland. Annual Report 2006.

**STUK-B 76** Rantanen Erkki (toim.). Säteilyn käyttö ja muu säteilylle altistava toiminta. Vuosiraportti 2006.

**STUK-B 75** Kainulainen E (toim.). Ydinenergian käytön turvallisuusvalvonta. Vuosiraportti 2006.

**STUK-B 74** Hämäläinen M (ed.). Nuclear Safeguards in Finland 2006.

**STUK-B 73** Kainulainen E (toim.). Säteily- ja ydinturvallisuus. Neljännesvuosiraportti 4/2006.

**STUK-B 72** Toivonen M. Suureet ja yksiköt säteilysuojelussa. Säteilyturvakeskus 1989

**STUK-B-STO 62** Tenkanen-Rautakoski P. Radiologisten tutkimusten ja toimenpiteiden määrät vuonna 2005. Helsinki 2006.

**STUK-B-STO 61** Rantanen E (ed.) Radiation Practices. Annual Report 2005. Helsinki 2006.

**STUK-B-STO 60** Rantanen E. (toim.) Säteilyn käyttö ja muu säteilylle altistava toiminta. Vuosiraportti 2005. Helsinki 2006.

**STUK-B-STO 59** Rantanen E. (ed.) Radiation Practices. Annual Report 2004. Helsinki 2005.

**STUK-B-STO 58** Korpela H. Radioaktiivisten lääkevalmisteiden käyttö Suomessa vuonna 2003. Helsinki 2005.

**STUK-B-STO 57** Rantanen E. (toim.) Säteilyn käyttö ja muu säteilylle altistava toiminta. Vuosiraportti 2004. Helsinki 2005.

**STUK-B-STO 56** Visuri R, Huurto L, Nyberg H. Muutokset solariumien käyttöpaikkojen säteilyturvallisuudessa 1998–2002. Helsinki 2004.

**STUK-B-STO 55** Rantanen E. (ed.) Radiation Practices. Annual Report 2003. Helsinki 2004.

**STUK-B-STO 54** Rantanen E. (toim.) Säteilyn käyttö ja muu säteilylle altistava toiminta. Vuosiraportti 2003. Helsinki 2004.

**STUK-B-STO 53** Piri A. Säteilysuojelukoulutuksen tila ja tarve Suomessa vuonna 2003. Helsinki 2004.

**STUK-B-STO 52** Miettinen A, Pirinen M. The Dose and Image Quality in Mammography Practice in Finland. Helsinki 2003.

**STUK-B-STO 51** Rantanen E. (ed.) Radiation Practices. Annual Report 2002. Helsinki 2003.

**STUK-B-raportit STUKin verkkosivuilla:**  
[www.stuk.fi/julkaisut\\_maaraykset/fi\\_FI/listaus/?sarja=STUK-B](http://www.stuk.fi/julkaisut_maaraykset/fi_FI/listaus/?sarja=STUK-B)